

基于导模共振效应三基色窄带滤光片的研究

孔伟金 郑併斌 云茂金 匡 杰 王书浩 许家锋

(青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071)

摘要 为获得性能优良的三基色窄带滤光片,提出了一种基于减反射薄膜波导光栅结构的导模共振滤光片。该滤光片由亚波长光栅结构、波导层和基底组成。采用严格耦合波理论分析了亚波长光栅结构和波导层厚度对导模共振滤光片反射光谱性能的影响。数值分析表明 $\lambda/4-\lambda/2-\lambda/4$ 结构能有效提高导模共振滤光片的性能。当光栅结构位于基底侧时,红绿蓝三基色滤光片旁通带截止带宽分别为 447, 349 和 279 nm, 反射率均优于 95%, 反射带均小于 0.2 nm。设计的三基色滤光片具有良好的窄带反射特性,在彩色合成与调制中有应用前景。

关键词 衍射;导模共振;三基色;亚波长光栅

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1005006

Guided-Mode Resonance Filter with Narrow Waveband for Three Primary Colors

Kong Weijin Zheng Bingbin Yun Maojin Kuang Jie Wang Shuhao Xu Jiafeng

(College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract A guided-mode resonant filter (GMRF) based on the structure of anti-reflection (AR) thin film waveguide is proposed to realize three-primary-color filter with narrow-band. The proposed grating consists of three parts: a sub-wave grating, a waveguide and a substrate. The effects of sub-wave grating and thickness of waveguide on the GMRF reflection spectrum are investigated in detail with the method of rigorous coupled-wave analysis (RCWA). Simulation results show that the structure of $\lambda/4-\lambda/2-\lambda/4$ can improve the performance of GMRF effectively. When the grating layer is located near the substrate, the cut-off band of the optimized filter for red, green and blue primary colors are 447, 349 and 279 nm, respectively. The reflectance is above 95% and reflection bands are all narrower than 0.2 nm. The optimized GMRF shows excellent performance with narrow band and can be useful for color synthesis and modulation.

Key words diffraction; guided-mode resonance; three primary colors; sub-wave grating

OCIS codes 050.1950; 050.6624; 050.2770; 050.1950

1 引 言

红绿蓝三基色滤光片在光通讯、光谱测量、传感和成像等领域具有广泛的应用,是投影仪、CCD 成像元件和显示等光学仪器中合色与分色以及光调制的关键元件^[1,2]。传统法布里-珀罗(F-P)干涉滤光片的透射带带宽和旁通带截止特性受到中间过渡层的影响。基于多层介质膜干涉原理的截止滤光片采用高低折射率交替结构,其透射带的透射率、透射带宽和旁通带的截止深度对膜层的结构和制备工艺误

差非常敏感^[3]。

导模共振效应是指当入射光与光栅的泄漏模耦合时产生的光谱异常现象,基于此效应设计的导模共振滤光片(GMRF)主要由亚波长光栅结构(周期小于入射波长)与介质波导层组成,当导模共振滤光片的结构参数满足相位匹配条件时,会产生高衍射效率的反射或者透射峰^[4,5]。导模共振滤光片具有高峰值反射率、低旁通带反射、窄带以及带宽可控等优良特性^[6]。张大伟等^[7,8]详细研究了表面镀膜对

收稿日期: 2011-04-22; 收到修改稿日期: 2011-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(10804060, 10904080)资助课题。

作者简介: 孔伟金(1976—),男,博士,副教授,主要从事衍射光学和薄膜光学等方面的研究。E-mail: kwjds@163.com

导模共振滤光片性能的影响以及方位角调谐的窄带导模共振滤光片的设计。麻健勇等^[9]通过对导模共振光栅结构进行抗反射设计,有效地降低了导模共振光栅旁通带反射率。王振华等^[10]研究了缓冲层对导模共振滤光片反射光谱特性截止特性的影响。周云等^[11,12]研究了一维亚波长金属光栅结构的彩色滤光片的衍射性能,设计出一种宽光谱、高透射效率且易于加工的彩色滤光片。

本文基于减反射(AR)薄膜波导光栅结构^[13],将薄膜结构中的减反射效应与波导光栅的共振效应结合起来设计红绿蓝三基色窄带反射式滤光片。利用严格耦合波理论(RCWA)^[14,15]对导模共振光栅的衍射特性进行分析,通过对光栅浮雕结构和波导层厚度进行优化,获得了性能优良的红绿蓝窄带滤光片,并讨论了光栅参数对导模共振滤光片性能的影响。

2 理论模型

导模共振滤光片的结构如图 1 所示, ϵ_c, ϵ_s 分别是覆盖层和基底的相对介电常数,光栅层厚度为

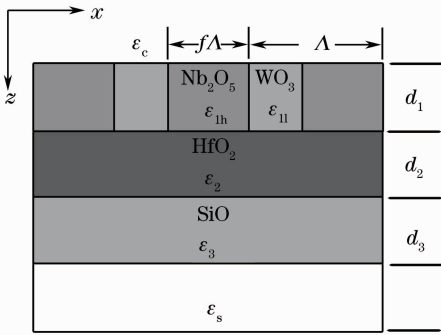


图 1 光栅在表面的导模共振滤光片

Fig. 1 Schematic diagram of GMRF with the grating at the top

d_1 , 光栅周期为 Λ , 光栅占空比为 f , 所用材料的高、低介电常数分别为 ϵ_{1h} 和 ϵ_{1l} 。均匀层的厚度为 d_2, d_3 , 介电常数分别为 ϵ_2, ϵ_3 。

设计中采用 $\lambda/4-\lambda/4-\lambda/4$ 型具有三层减反射薄膜结构的波导光栅。对于具有减反射结构的三层膜,各层之间应满足

$$\epsilon_1^2 \epsilon_3^2 / \epsilon_2^2 = \epsilon_c \epsilon_s, \quad (1)$$

$$d_i = \lambda / (4 \sqrt{\epsilon_i}), \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

其中在光栅表面浮雕结构区,周期性的相对介电常数可以展开成傅里叶级数,对于矩形光栅结构其等效介电常数为^[6]

$$\epsilon = \epsilon_h f + \epsilon_l (1 - f). \quad (3)$$

利用(1)~(3)式确定光栅的结构参数,利用严格耦合波理论计算并分析其反射特性^[16]。考虑到薄膜制备的工艺,设计中选择常用的镀膜材料。

3 三基色导模共振滤光片设计

3.1 光栅结构位于顶层的导模共振滤光片设计

在图 1 的结构中,以 TE 偏振光正入射,即入射角 $\theta = 0^\circ$,光栅结构位于表面,取占空比 $f = 0.5$,光栅层高折射率材料 Nb_2O_5 和低折射率材料 WO_3 的介电常数分别为 $\epsilon_{1h} = 3.1$ 和 $\epsilon_{1l} = 2.8$,则光栅层等效介电常数 $\bar{\epsilon}_1 = 2.95$ 。均匀波导层分别采用 HfO_2 ($\epsilon_2 = 3.88$) 和 SiO ($\epsilon_3 = 2.13$) 材料。覆盖层为空气, $\epsilon_c = 1$; 基底 $\epsilon_s = 2.62$ 。

当中心波长为 700 nm(红光)时,由(2)式可计算各膜层厚度分别为: $d_1 = 101.89$ nm, $d_2 = 88.84$ nm, $d_3 = 119.91$ nm, 周期 $\Lambda = 428.3$ nm。光栅的反射率光谱曲线如图 2(a)所示。从图中可以看出,旁通带的反射率低于 1% 的光谱范围较小,这并不是一个理想结果。

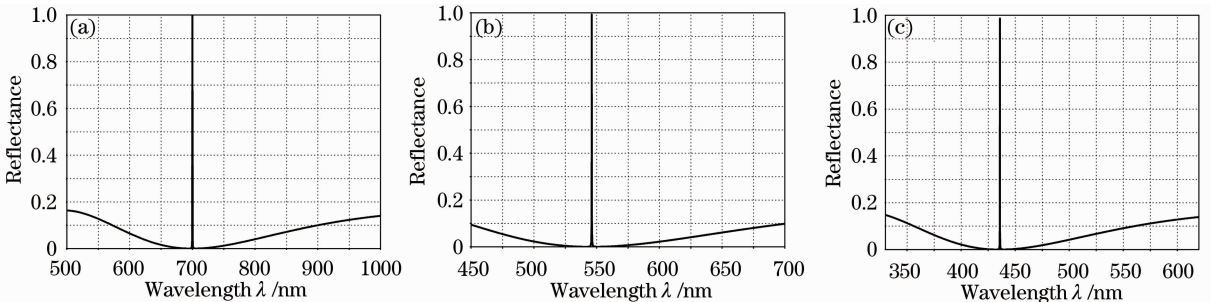


图 2 导模共振滤光片的光谱。(a) 红光; (b) 绿光; (c) 蓝光

Fig. 2 Spectra of GMRF. (a) Red light; (b) green light; (c) blue light

同样,当中心波长为 546.1 nm(绿光)时可得各膜层厚度分别为 $d_1 = 79.49$ nm, $d_2 = 69.31$ nm, $d_3 = 93.55$ nm, 光栅周期 $\Lambda = 334.14$ nm。而对于蓝光(435.8 nm),各膜层厚度分别为 $d_1 = 64.43$ nm, $d_2 = 55.31$ nm, $d_3 = 74.65$ nm, 光栅周期 $\Lambda = 266.65$ nm。其对应的反射率光谱曲线分别如图 2(b),(c)所示,可见其旁通带的反射率较高,使用中容易产生杂散光。

3.2 光栅位于基底侧的导模共振滤光片设计

由上述分析可知图 1 所示结构的三基色导模共振滤光片的反射效果不是最优结果。通过改变光栅结构的位置进一步改进其反射特性,为不改变上述结构的材料选择,考虑光栅位于基底侧的结构,同时第一层调整为 SiO, 即 $\epsilon_1 = 2.13, \epsilon_2 = 3.88, \epsilon_{3h} = 3.1, \epsilon_{3l} = 2.8, \epsilon_c = 1, \epsilon_s = 2.62$, 如图 3 所示。显然,这种变化仍然满足(1)式的要求。对于中心波长分别 700, 546.1 和 435.8 nm 的红绿蓝三色光,各材料对应膜层的厚度不变。光栅周期分别为 $\Lambda_{red} = 420.5$ nm, $\Lambda_{green} = 328$ nm, $\Lambda_{blue} = 261.8$ nm。

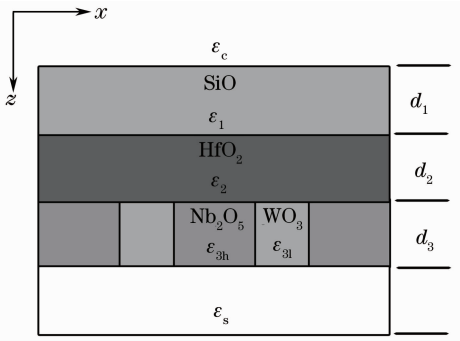


图 3 光栅位于基底侧的 GMRF 结构

Fig. 3 Optimized GMRF with the grating at the bottom

图 4(a)~(c)分别为与图 3 结构对应的红绿蓝三色光谱曲线。可以看出,虽然中心波长附近的旁通带被明显地压制下去,但是在中心波长处 ± 100 nm 区域内反射率仍然较大。图 4(a)~(c)中的小图分别给出了红绿蓝三色距离中心波长 ± 2 nm 范围内的反射率光谱曲线。红绿蓝三色光的反射带宽分别为 0.265, 0.205 和 0.165 nm。反射带宽较窄,是由于光栅层的调制率 $(\epsilon_h - \epsilon_l) / (\epsilon_h + \epsilon_l) = 0.051$ 较小导致的。

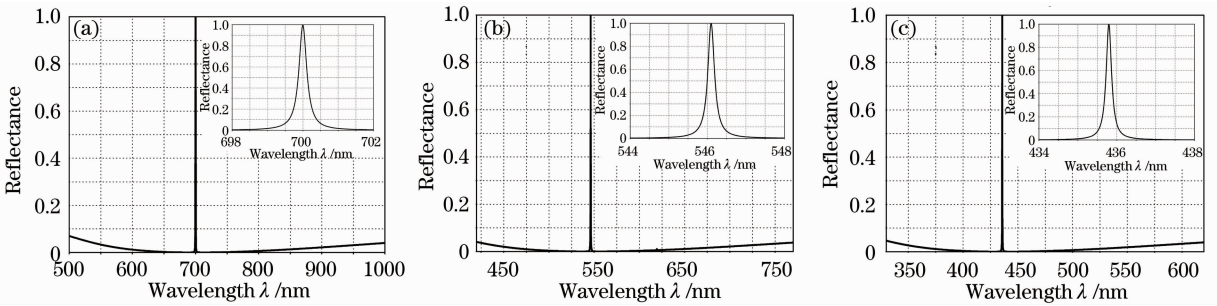


图 4 光栅位于基底侧的滤光片光谱。(a)红光;(b)绿光;(c)蓝光

Fig. 4 Spectra of optimized GMRF with the grating above the substrate. (a) Red light; (b) green light; (c) blue light

3.3 窄带红绿蓝三基色滤光片的优化设计

通过优化图 3 所示导模共振滤光片结构的膜层厚度,可以进一步提高滤光片旁通带的性能。图 3 结构中各膜层都是 $\lambda/4$ 光学厚度的情形。取第二层膜厚度等于 $\lambda/2$ 的光学厚度,即对于波长为 700 nm

的红光, $d_2 = \lambda / (2 \sqrt{\epsilon_2}) = 177.69$ nm, 其他结构参数不变,周期为 $\Lambda = 397.05$ nm, 对应的反射率光谱曲线如图 5(a)所示。该反射曲线在 $538.9 \text{ nm} \leq \lambda \leq 986.2 \text{ nm}$ 的光谱范围内(约 447 nm), 实现了旁通带的深度截止,而且反射带宽仅为 0.155 nm。

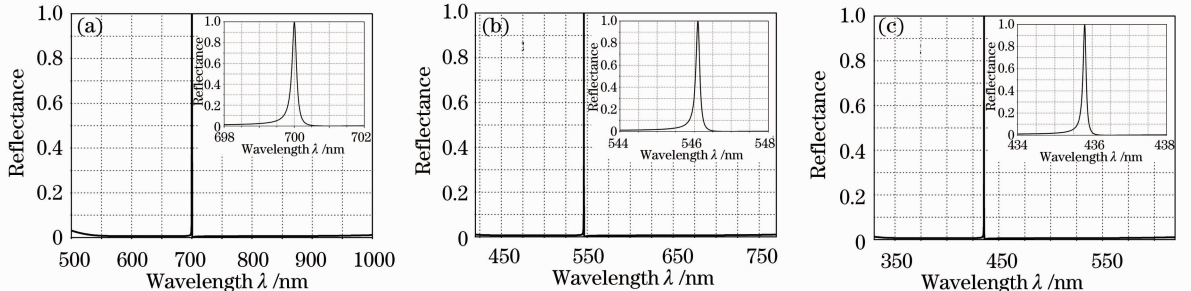


图 5 优化的三基色导模共振滤光片光谱。(a)红光;(b)绿光;(c)蓝光

Fig. 5 Spectra of optimized three-primary-color GMRF. (a) Red light; (b) green light; (c) blue light

对于中心波长分别为 546.1 nm(绿光)和 435.8 nm(蓝光)的情形,同样得到了很好的反射特性,如图 5(b),(c)所示。对于绿光,当光栅周期 $\Lambda=309.76$ nm, $d_2=138.62$ nm 时,在 420.4~769.4 nm 波长范围内实现旁通带的深度截止,带宽仅为 0.12 nm。对于蓝光,当光栅周期为 $\Lambda=247.19$ nm, $d_2=110.62$ nm 时,在 335.5~614 nm 波长范围内实现旁通带的深度截止,带宽仅为 0.1 nm。该结构满足三基色对窄带和宽旁通带的要求。

4 结 论

采用减反射特性的薄膜波导结构,利用严格耦合波理论分析了导模共振滤光片的反射特性,分别设计了适用于红绿蓝三基色的导模共振滤光片。数值分析表明 $\lambda/4-\lambda/2-\lambda/4$ 结构能有效提高导模共振滤光片的光谱性能。当光栅结构位于基底侧时,红绿蓝滤光片的旁通带截止带宽分别为 447,349 和 279 nm,反射带均小于 0.2 nm。本研究所设计的三基色滤光片在彩色合成与调制中具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Yu Kan, Huang Dexiu, Fan Ling *et al.*. Research on bandwidth depolarization of the angle tuning filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 214~217
俞 侃, 黄得修, 樊 玲 等. 角度调谐滤光片带宽消偏振研究 [J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 214~217
- 2 Shi Lingna, Pan Yingjun, Zhang Jie *et al.*. Study of display properties of lighting source based on grating light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 531~536
史玲娜, 潘英俊, 张 洁 等. 基于光栅光调制器的照明光源的显示特性研究 [J]. 光学学报, 2010, **30**(2): 531~536
- 3 Lu Baowen, Xu Xueke, Liu Guanghui *et al.*. Genetic analysis and suppression of multiple cavity induced transmission filters defect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2149~2153
卢宝文, 徐学科, 刘光辉 等. 多腔诱导透射滤光片缺陷的成因分析及抑制 [J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 2149~2153
- 4 S. S. Wang, R. Magnusson. Design of waveguide-grating filters with symmetrical line shapes and low sidebands [J]. *Opt. Lett.*,

- 1994, **19**(12): 919~921
- 5 S. S. Wang, R. Magnusson. Multilayer waveguide-grating filters [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2414~2440
- 6 S. Tibuleac, R. Magnusson. Reflection and transmission guided-mode resonance filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(7): 1617~1626
- 7 Zhang Dawei, Yuan Limeng, Huang Yuanshen *et al.*. Influence of film on the characteristics of sub-wave grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3060~3063
张大伟, 袁丽萌, 黄元申 等. 导模共振滤光片表面镀膜对其物理特性的影响 [J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 3060~3063
- 8 Zhang Dawei, Wang Qi, Zhu Yiming *et al.*. Design of guided mode resonant filters tuned by azimuthal angle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 950~953
张大伟, 王 琦, 朱亦鸣 等. 方位角调谐的反射窄带导模共振滤光片设计 [J]. 中国激光, 2010, **37**(4): 950~953
- 9 Ma Jianyong, Liu Shijie, Wei Zhaoyang *et al.*. Design of reflection resonant grating filters [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 827~832
麻健勇, 刘世杰, 魏朝阳 等. 反射型导模共振滤波器设计 [J]. 物理学报, 2008, **57**(2): 827~832
- 10 Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Sang Tian *et al.*. Impact of buffer layer on cut-off properties of reflection spectra for guided-mode resonance filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 849~852
王振华, 吴永刚, 桑 田 等. 缓冲层对导模共振滤光片反射光谱截止特性的影响 [J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 849~852
- 11 Zhou Yun, Ye Yan, Shen Su *et al.*. Research of the characteristic of sub-wavelength grating color filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0123003
周 云, 叶 燕, 申 溯 等. 亚波长光栅结构彩色滤光片研究 [J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0123003
- 12 Ye Yan, Zhou Yun, Zhang Heng *et al.*. Polarizing color filter based on a submicron metal grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0405003
叶 燕, 周 云, 张 恒 等. 金属光栅型偏振彩色滤光片 [J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0405003
- 13 A. Mizutani, H. Kikuta, K. Iwata. Guided-mode resonance grating filter with an antireflection structure surface [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(7): 1346~1351
- 14 M. G. Moharam, Eric B. Grann, Drew A. Pommet. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled wave analysis of binary gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1068~1076
- 15 M. G. Moharam, D. A. Pommet, E. B. Grann. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis of surface-relief gratings; enhanced transmittance matrix approach [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1077~1086
- 16 T. K. Gaylord, M. G. Moharam. Analysis and applications of optical diffraction by grating [J]. *Proc. IEEE*, 1985, **73**(5): 894~937